

На правах рукописи

Цыганок Елена Анатольевна

УДК 535.31

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ,  
РАБОТАЮЩИХ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

05.11.07 “Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Санкт-Петербург – 2012



## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы:**

В связи с созданием и широким распространением приемников оптического излучения, работающих в спектральном интервале, превышающем границы видимой области, возникает необходимость разработки соответствующих объективов. Такие системы используются, например, в приборах для сумеречного наблюдения в условиях естественной освещенности с использованием матричных приемников, обеспечивающих высокую чувствительность в спектральном диапазоне 400 – 900 нм.

Принципиальной трудностью при разработке длиннофокусных, светосильных систем, работающих в широком спектральном интервале, является устранение вторичного спектра, как аберрации определяющей качество изображения таких систем.

Вопросы теории и практики проектирования и расчета апохроматических систем получили развитие в трудах Л.Н. Андреева, Д.Ю. Гальперна, А.П. Грамматина, Г.А. Можарова, Б.Л. Нефедова, М.М. Русинова, Г.Г. Слюсарева, В.Н. Чуриловского, R.E. Stephens, C.G. Wynne и др.

Для создания апохроматических систем часто используются кристаллы (кварцевое стекло, фтористый литий и др.) и стекла с особым ходом дисперсии. Системы из этих материалов, как правило, являются чувствительными к изменению температуры окружающей среды. Вследствие чего возникают терморассфокусировка и термоабберации, которые необходимо учитывать при разработке данного типа систем.

Актуальной является задача исследования возможности создания апохроматических систем для спектрального диапазона 400 – 900 нм, аберрационные свойства которых будут изменяться в допустимых пределах при изменении температуры.

### **Цель работы:**

Анализ исследования возможности создания и разработка апохроматических линзовых объективов, работающих в области спектра 400 – 900 нм.

### **Задачи исследования:**

1. Построение диаграммы зависимости относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии в области спектра 400 – 900 нм для стекол ГОСТа 3514– 94, флюорита и фтористого лития
2. Исследование классических формул хроматических аберраций второго порядка для области спектра 400 – 900 нм.
3. Исследование возможности коррекции вторичного спектра для диапазона длин волн 400 – 900 нм на основе стекол с обычным ходом дисперсии.
4. Разработка объективов коллиматоров, работающие в области спектра 400 – 900 нм.
5. Разработка светосильных объективов для области спектра 400 – 900 нм.

### **Методы исследования:**

При решении поставленных задач использовались методы:

1. Компьютерного моделирования оптических систем
2. Автоматизированного проектирования оптических систем
3. Оптимизации конструктивных параметров оптических систем

### **Научная новизна работы:**

1. Показана принципиальная возможность полного устранения вторичного спектра в системах из стекол с обычным ходом дисперсии.
2. Обнаружено наличие трех экстремальных точек кривой остаточного хроматизма при апохроматической коррекции в диапазоне длин волн 400 – 900 нм.
3. Подтверждена возможность создания и приведены расчеты объективов коллиматоров для области спектра 400 – 900 нм из стекол с обычным ходом дисперсии.
4. Подтверждена возможность создания и выполнены расчеты светосильных объективов для области спектра 400 – 900 нм из стекол с обычным ходом дисперсии.

### **Основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Возможность полного устранения вторичного спектра в системах из стекол с обычным ходом дисперсии.

2. Принципы построения оптических систем с апохроматической коррекцией для трех длин волн из стекол с обычным ходом дисперсии.
3. Коэффициент пропорциональности вторичного спектра фокусному расстоянию системы из ахроматических компонентов, выполненных из стекол с обычным ходом дисперсии для спектрального диапазона 400 – 900 нм.
4. Оптические схемы линзовых объективов коллиматоров, работающих в области спектра 400 – 900 нм.
5. Оптические схемы светосильных линзовых объективов, работающих в области спектра 400 – 900 нм.
6. Оценка чувствительности полученных систем к изменению температуры окружающей среды.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработаны практические рекомендации по созданию апохроматических систем из стекол с обычным ходом дисперсии.
2. Сформулированы практические рекомендации по выбору марок оптических стекол для создания апохроматических термостабильных систем, работающих в области спектра 400 – 900 нм.
3. Диаграмма зависимости относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии в области спектр 400-900 нм для стекол ГОСТа 3514-94, флюорита и фтористого лития.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты работы представлялись на VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (г. Санкт–Петербург, 2009); VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (г. Санкт–Петербург, 2010); VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (г. Санкт–Петербург, 2011); XXXIX научной и учебно – методической конференции СПбГУ ИТМО (г. Санкт–Петербург, 2010); XL научной и учебно – методической конференции НИУ ИТМО (г. Санкт–Петербург, 2011); XXXLI научной и учебно – методической конференции НИУ ИТМО (г. Санкт–Петербург, 2012).

Проводимые исследования поддержаны индивидуальным грантом комитета по науке и высшей школе Правительства г. Санкт – Петербурга в 2011 году (ПСП №11628).

### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

### **Личный вклад автора:**

Личное участие в апробации результатов исследования; при участии автора, проводилась подготовка основных публикаций по выполненной работе; непосредственно автором были проведены исследования возможности коррекции вторичного спектра и создания апохроматических систем для области спектра 400 – 900 нм; рассчитаны новые оптические схемы длиннофокусных и светосильных объективов.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 41 наименований и 3 приложений; содержит 107 страниц основного текста, 60 рисунков и 15 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, отображены научная новизна и практическая ценность работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, определены основные направления исследования.

**В первой главе** диссертационной работы проведено исследование вторичного спектра линзовых оптических систем.

Показана применимость классических формул расчета хроматических aberrаций второго порядка для области спектра 400 – 900 нм, основанных на дифференцировании показателей преломления.

В линзовых системах, работающих в широком спектральном диапазоне длин волн, aberrацией, определяющей качество изображения, является вторичный спектр. Он зависит от относительной частной дисперсии –  $p_x$  и коэффициента дисперсии стекла –  $v_e$ , и для большинства из них эти параметры связаны зависимостью близкой к линейной. Соответствующую прямую принято называть «нормальной» (рис. 1), в области спектра от 400 до

900 нм она будет описываться уравнением (1)

$$p_x = 0,657 - 0,43 \cdot 10^{-2} \nu \quad (1)$$

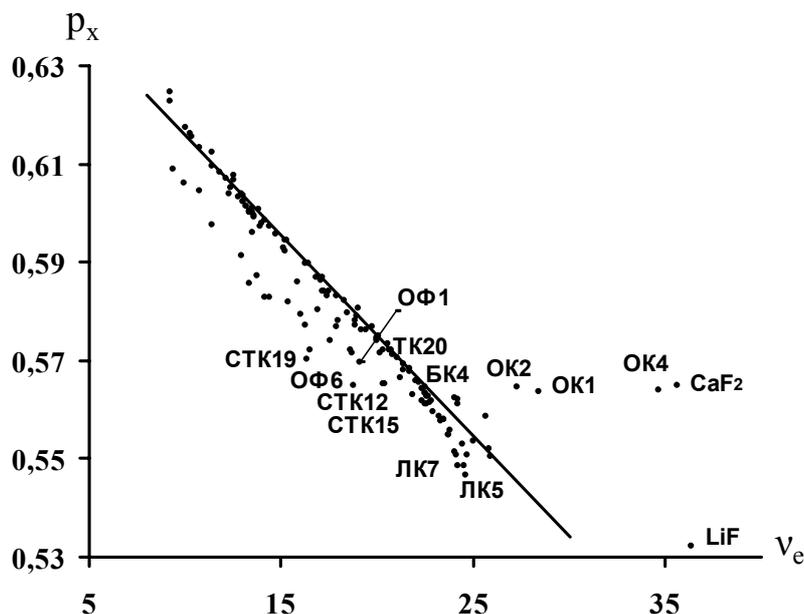


Рис.1 Диаграмма зависимости относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии стекла.

Особыми принято называть стекла, коэффициенты дисперсий и относительные частные дисперсии которых не удовлетворяют линейной зависимости. Стекла, оптические параметры которых лежат на прямой – обычными. Как известно, при любом количестве линз, входящих в оптическую систему из апохроматических компонентов, выполненных из обычных стекол, вторичный спектр остается неизменным. Он прямопропорционален фокусному расстоянию системы  $f'$  и в диапазоне длин волн 480 – 648 нм определяется формулой:

$$S'_{F'(C')} - S'_e \approx 0,57 \cdot 10^{-3} f' \quad (2)$$

Для спектрального диапазона 400 – 900 нм, вторичный спектр увеличивается примерно в 7,5 раз и будет определяться формулой:

$$S'_{400(900)} - S'_e \approx 0,43 \cdot 10^{-2} f' \quad (3)$$

График зависимости величины отступления положения изображения для длин волн выбранного интервала от изображения для основной длины волны в системах с особыми стеклами при ахроматической коррекции имеет две экстремальные точки. Их наличие при апохроматической коррекции было

замечено в трудах проф. В.И. Чуриловского и проф. Л.Н.Андреева. Поэтому величина остаточного хроматизма будет определяться расстоянием между этими экстремумами (рис. 2).

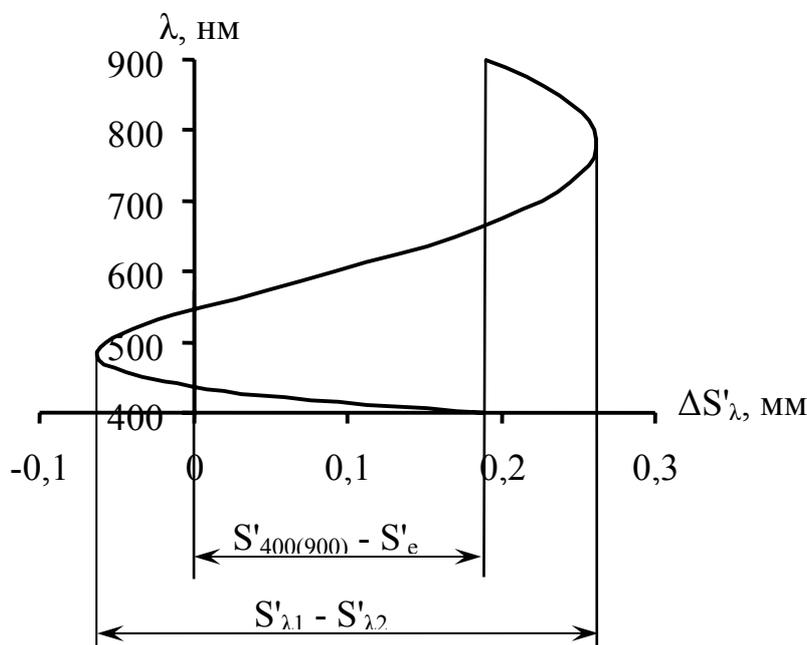


Рис.2 Вторичный спектр и остаточный хроматизм системы с  $f'=1000\text{мм}$ , выполненной из стекол ОК1 и СТК12

Так, например, комбинация оптических материалов CaF и ОФ6, имея меньшее значение вторичного спектра, обладает большим остаточным хроматизмом, чем ОК1 и СТК12 (табл.1).

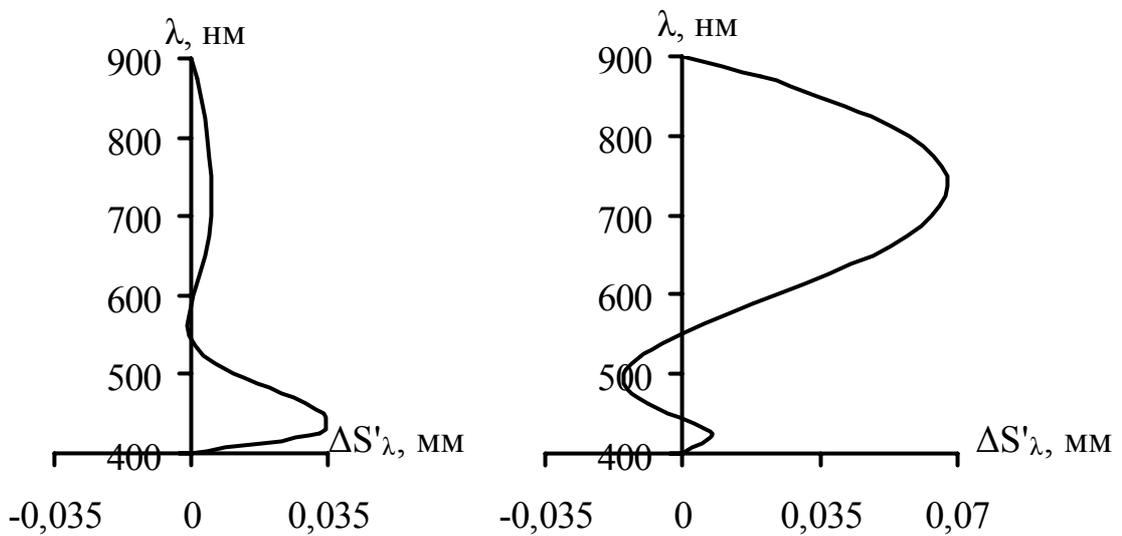
Таблица 1.

Вторичный спектр и остаточный хроматизм

	CaF-ОФ6	ОК1-СТК12
Разность относительных частных дисперсий	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Разность коэффициентов дисперсии ( $\Delta v_e$ )	16,864	8,026
Вторичный спектр ( $S'_{400(900)} - S'_e$ ), мм	0,009	0,194
Остаточный хроматизм ( $S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}$ ), мм	0,475	0,324

Использование трех и более сортов стекол позволяет достичь лучших результатов в коррекции вторичного спектра. Его значение уменьшается в 2 раза, по сравнению с композицией из двух материалов. При этом было

обнаружено, что количество экстремумов на графике вторичного спектра увеличивается (рис. 3).



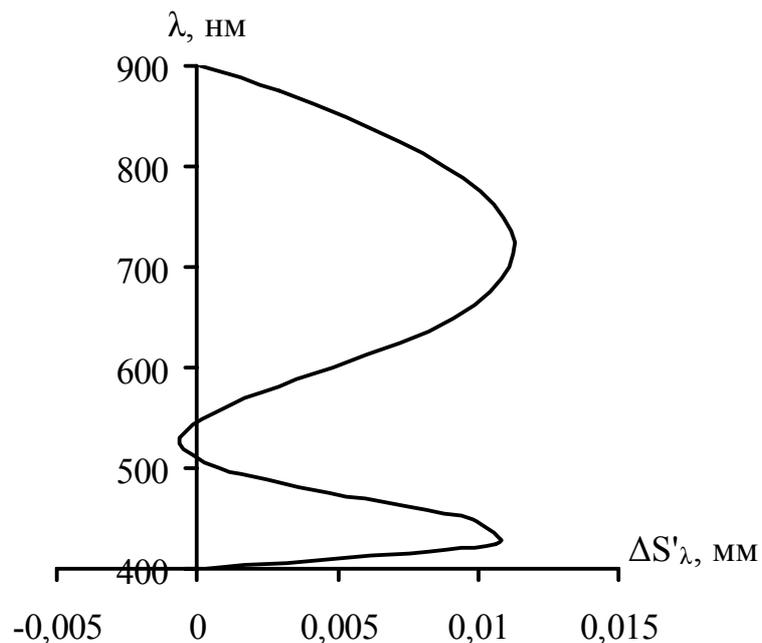
а) *СТК16 – ТБΦ3 – ОК1*

б) *N-LAF34 – SF11 – N-PK51*

*Рис.3 Остаточный хроматизм системы с  $f'=1000$ мм*

На рисунке 3б показан остаточный хроматизм комбинации стекол из каталога Шотта.

Подбором материала можно добиться одинакового значения величины отступления изображения для экстремальных длин волн от основной, тем самым уменьшить величину остаточного хроматизма системы (рис. 4).



*Рис.4 Остаточный хроматизм системы с  $f'=1000$  мм, выполненной из стекол ОК1 – СТК19 – ТΦ12*

Так как чувствительность кремниевых приемников оптического излучения к красной области спектра несколько ниже, чем к синей (рис. 5), приемлемым является вариант на рисунке 3б.

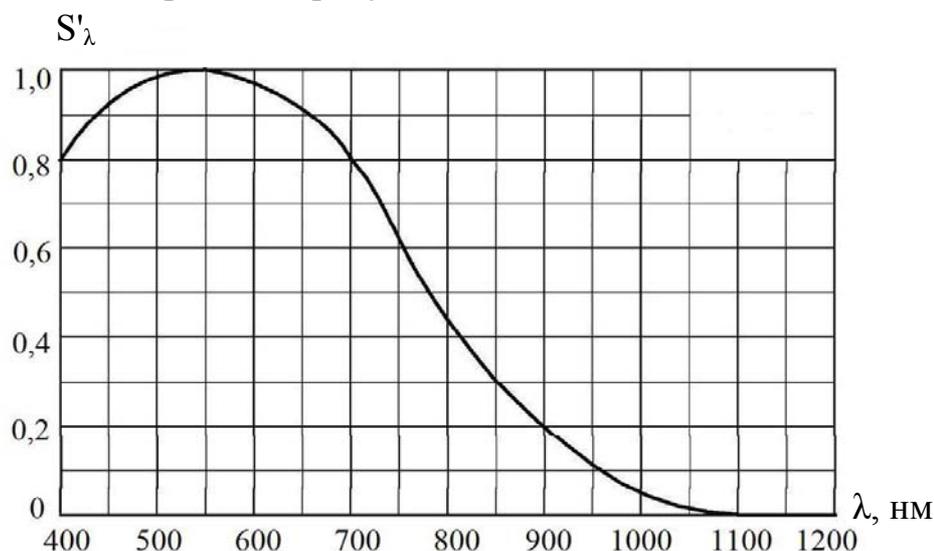


Рис.5 Спектральная чувствительность кремниевого приемника оптического излучения (TOSHIBA TCD 1304).

**Во второй главе** диссертационной работы рассмотрены возможности создания апохроматических систем.

Апохроматическая коррекция оптической системы возможна при использовании:

1. Голографического элемента
2. Ахроматизованных компонентов системы
3. Неахроматизованных компонентов системы

В первом разделе данной главы проведен анализ апохроматических систем с голограммным оптическим элементом.

Причиной возникновения хроматических aberrаций в оптических системах является дисперсия, т.е. зависимость показателей преломления материалов, из которых они выполнены, от длины волны света, в результате чего при преломлении полихроматического пучка на поверхности системы происходит его расщепление на пучок монохроматических лучей, идущих в различных направлениях. Синие лучи преломляются сильнее, чем красные. В случае дифракционной решетки красные лучи преломляются сильнее. Поэтому в качестве компенсации хроматических aberrаций могут применяться дифракционные оптические элементы. Но дополнительные

дифракционные порядки изображения воспринимаются приемником оптического излучения как рассеянный свет. Применение систем с голограммным оптическим элементов для коррекции хроматических aberrаций ограничивается случаем точечного источника. Для протяженных источников побочные изображения снижают качество изображения.

Традиционно, в оптических системах для одновременного устранения хроматизма положения и хроматизма увеличения применяют ахроматизованные компоненты. Как было показано в работе профессора Г.А. Можарова за счет изменения воздушного промежутка между бесконечно тонкими ахроматизованными компонентами объективов, вторичный спектр может быть уменьшен примерно на 40 %.

В рамках диссертационной работы было проведено исследование возможности исправления вторичного спектра в двухкомпонентных системах, состоящих из линз, выполненных из обычных стекол, за счет изменения расстояния между неахроматизованными компонентами (рис.6). В качестве первого компонента системы использовалась одиночная линза, выполненная из тяжелого флинта ТФ10 ( $n_e = 1,62058$ ). Второй компонент – две тонкие линзы, выполненные из стекол марок ЛК3 и ТФ10. Воздушный промежуток между компонентами изменялся в диапазоне  $(0,1-1,5)f'$ , где  $f'$  – фокусное расстояние системы, которое принималось равным 150 мм.

Во всех случаях вторичный спектр, как расстояние между параксиальными изображениями для основной длины волны и крайних длин волн, равнялся нулю. Для сравнения, согласно традиционной теории хроматизма, вторичный спектр в системе из стекол ЛК3 и ТФ10 с фокусным расстоянием 150 мм при исправлении хроматизма в каждом компоненте должен быть равным 0,645 мм. Результаты исследования представлены в таблице 2.

В таблице 2 приняты следующие обозначения:  $S_{II}$  – основной параметр Г.Г. Слюсарева, характеризующий хроматические aberrации, второго компонента,  $\phi_1$  – оптическая сила первого компонента,  $\phi_2$  – оптическая сила первой линзы второго компонента,  $\phi_3$  – оптическая сила второй линзы второго компонента,  $d$  – расстояние между компонентами.

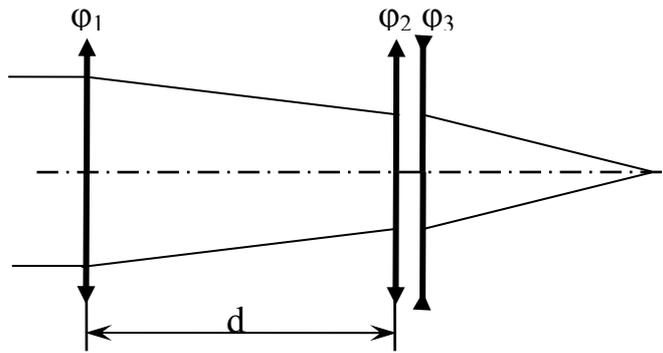


Рис.6 Схема двухкомпонентной апохроматической системы из обычных стекол:  $\varphi_1$  – оптическая сила первого компонента,  $\varphi_2$  – оптическая сила первой линзы второго компонента,  $\varphi_3$  – оптическая сила второй линзы второго компонента,  $d$  – расстояние между компонентами.

Таблица 2

Оптические силы компонентов ахроматизованной системы при изменении расстояния между компонентами.

D	$C_{II}$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
200	0,115	0,493	8,900	-7,422
175	0,142	0,553	8,893	-7,632
150	0,192	0,632	8,915	-8,292
125	0,311	0,740	8,971	-7,915
100	1,149	0,896	9,082	-8,824
75	-0,788	1,146	9,330	-9,672
50	-0,225	1,617	9,843	-11,182
25	-0,117	2,907	11,36	-15,059
15	-0,07	11,489	20,675	-37,673

Обратим внимание, что при малых воздушных промежутках основной параметр Г.Г.Слюсарева  $C$  во втором компоненте достигает необычных величин, что затрудняет его реализацию и приводит к необходимости использованию чрезвычайно больших относительных оптических сил, входящих в этот компонент. Естественно, такие оптические системы

неосуществимы практически. Начиная с воздушного промежутка равного фокусному расстоянию при разделении положительной линзы второго компонента на две, появляется возможность создания таких систем.

В таблице 3 приведены рекомендуемые марки стекол для второго компонента при создании апохроматических систем в области спектра 400 – 900 нм и их остаточный хроматизм ( $S'_{\lambda_{\lambda 1}} - S'_{\lambda_{\lambda 2}}$ ) при  $d=f'=150\text{мм}$ . В качестве первого компонента рекомендуется применять марки стекол относящиеся к группе тяжелых флинтгов.

*Таблица 3*

*Рекомендуемые марки стекол для второго компонента и их остаточный хроматизм.*

Марки стекло	$S'_{\lambda_{\lambda 1}} - S'_{\lambda_{\lambda 2}}$	Марки стекло	$S'_{\lambda_{\lambda 1}} - S'_{\lambda_{\lambda 2}}$
ТФ3 – ТК21	0,109	ТФ7 – ТК23	0,189
ТФ3 – ТК16	0,150	ТФ7 – ЛК3	0,218
ТФ3 – ТК23	0,185	ТФ10 – ТК21	0,141
ТФ3 – ЛК3	0,216	ТФ10 – ТК16	0,180
ТФ7 – ТК21	0,118	ТФ10 – ТК23	0,201
ТФ7 – ТК16	0,165	ТФ10 – ЛК3	0,226

При этом хроматизм увеличения объектива чрезвычайно велик (до 9%). Для его устранения необходимо применение третьего компонента.

**В третьей главе** диссертационной работы приведены практические рекомендации по построению апохроматических систем, а так же представлены результаты расчета объективов коллиматоров, работающих в области спектра 400 – 900 нм.

Необходимость в апохроматических объективах возникает и при создании аттестационных систем, в частности объективов коллиматоров. Качество изображения, которых определяется исходя из ГОСТа 15114-78 «Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения». Как результат были рассчитаны

объективы коллиматоров с соответствующим качеством изображения. На рис.7 представлен объектив коллиматора с основными характеристиками  $f'=500$  мм,  $2\omega=30'$ ,  $K=5$ . В таблице 4 приведены числа Штреля и среднеквадратическое отклонение волнового фронта.

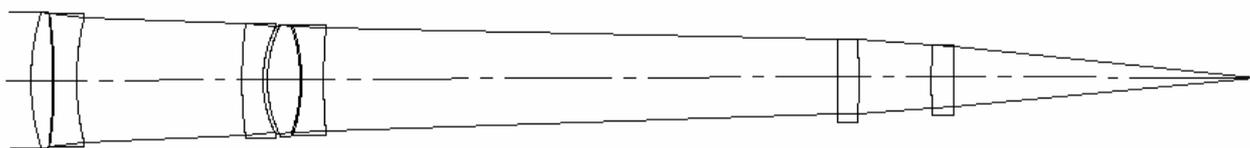


Рис.7 Объектив коллиматора с  $f'=500$  мм,  $2\omega=30'$ ,  $K=5$ ,  $L=897$ мм

Таблица 4

Число Штреля и среднеквадратичное отклонение волнового фронта (СКО) объектива коллиматора с  $f'=500$  мм,  $2\omega=30'$ ,  $K=5$

	$\lambda$ , нм				
	400	900	546	450	725
	$\omega=0$				
Число Штреля	0,96	0,96	0,93	0,90	0,91
СКО	0,031	0,032	0,042	0,051	0,048
	$\omega=21'$				
Число Штреля	0,94	0,97	0,96	0,86	0,89
СКО	0,040	0,026	0,023	0,061	0,053
	$\omega=30'$				
Число Штреля	0,91	0,98	0,97	0,81	0,83
СКО	0,048	0,022	0,026	0,072	0,069

Критерием оценки качества изображения является частотно – контрастная характеристика. Для частоты 100 лин/мм контраст должен быть не ниже 0,2. Рассчитанный объектив удовлетворяет данному требованию, на частоте 100 лин/мм контраст для осевой точки 0,33 и всех внеосевых точек поля – выше 0,2 (рис.8)

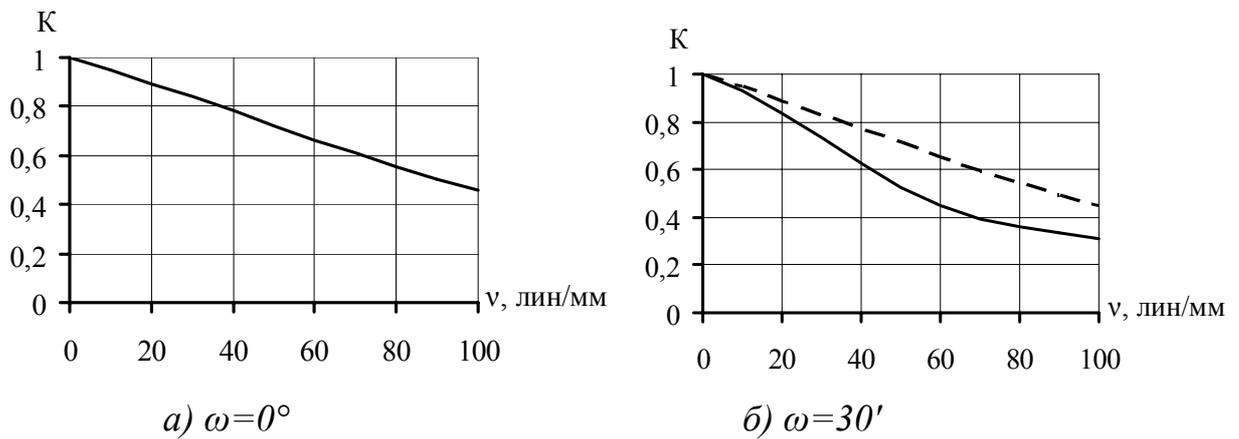


Рис.8 Частотно – контрастная характеристика объектива коллиматора с  $f'=500$  мм,  $2\omega=30'$ ,  $K=5$ . Пунктирной линией обозначено сагиттальное сечение,  $\nu$  – пространственная частота,  $K$  – контраст.

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты расчета апохроматических светосильных объективов, работающих в области спектра 400 – 900 нм.

Для апохроматизации оптических систем, в первую очередь объективов микроскопов, традиционно используется флюорит. Однако в рассматриваемом спектральном диапазоне он дает малый эффект по сравнению с особыми стеклами, что позволяет отказаться от флюорита в их пользу. На рис. 9. представлен линзовый объектив из особых стекол с основными характеристиками  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=1,3$ .

Критерием оценки качества изображения является частотно – контрастная характеристика. Используемый приемник оптического излучения (TOSHIBA TDC 1304) имеет размер пикселя 8 мкм. Для частоты 60 лин/мм коэффициент передачи контраста, в соответствии с техническим заданием, должен быть не ниже 0,6. Рассчитанный объектив удовлетворяет данному требованию, на частоте 60 лин/мм коэффициент передачи контраста для осевой точки 0,65 и всех внеосевых точек поля – не ниже 0,6 (рис.10)

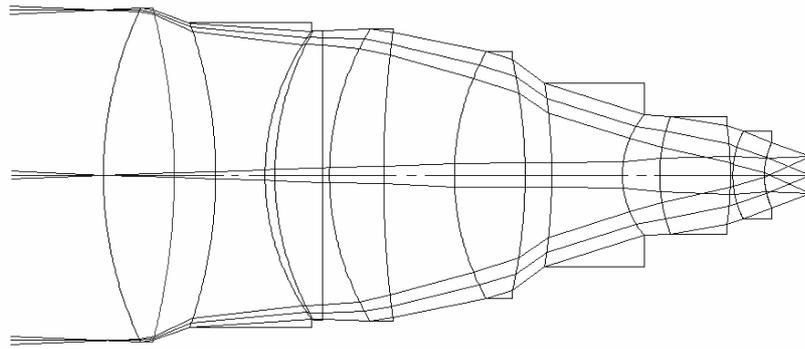


Рис.9 Объектив с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=1,3$ ,  $L=150$ мм

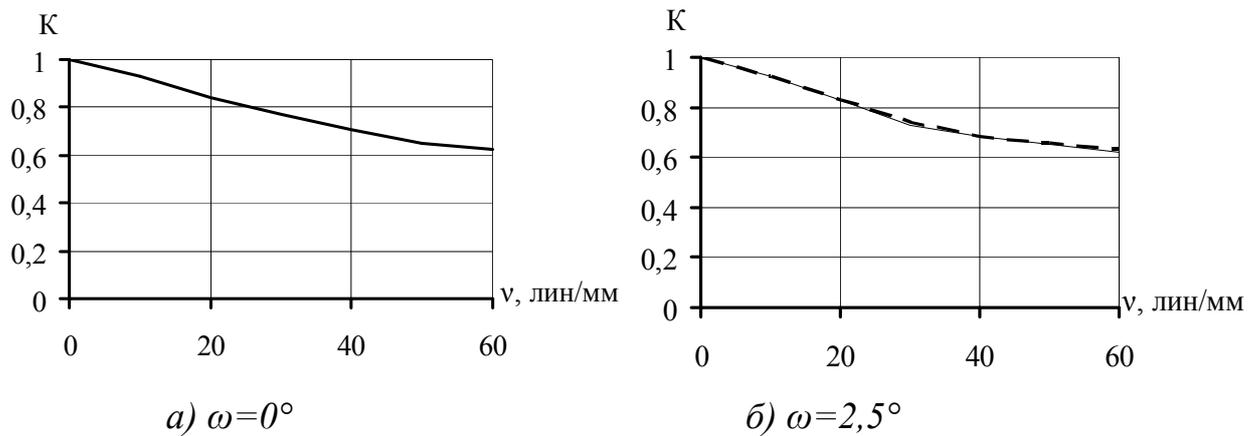


Рис.10 Частотно – контрастная характеристика объектива с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=1,3$ . Пунктирной линией обозначено сагиттальное сечение,  $v$  – пространственная частота,  $K$  – коэффициент передачи контраста.

Системы из особого стекла, очень чувствительны к изменению температуры внешней среды. Поэтому были рассчитаны апохроматические объективы, качество изображения которых при изменении температуры изменяется в допустимых пределах. В качестве примера таковых систем на рис. 11 представлен объектив, выполненный из обычных стекол, с основными характеристиками  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=2,5$ .

Критерием оценки качества изображения является частотно – контрастная характеристика. На частоте 60 лин/мм коэффициент передачи контраста для осевой точки 0,70 и всех внеосевых точек поля – не ниже 0,6 (рис.12)

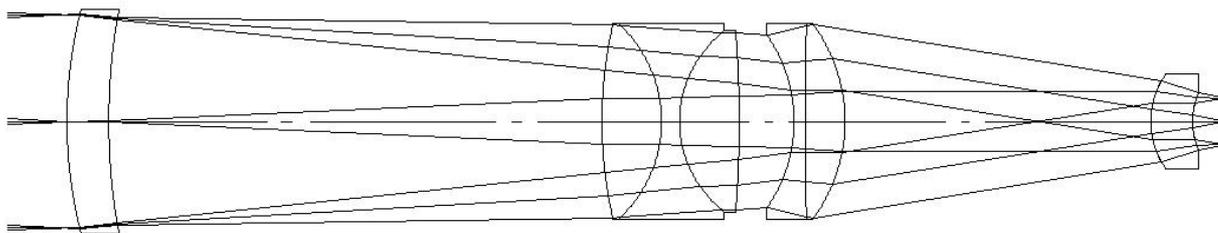


Рис.11 Объектив с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=2,5$   $L=190$ мм

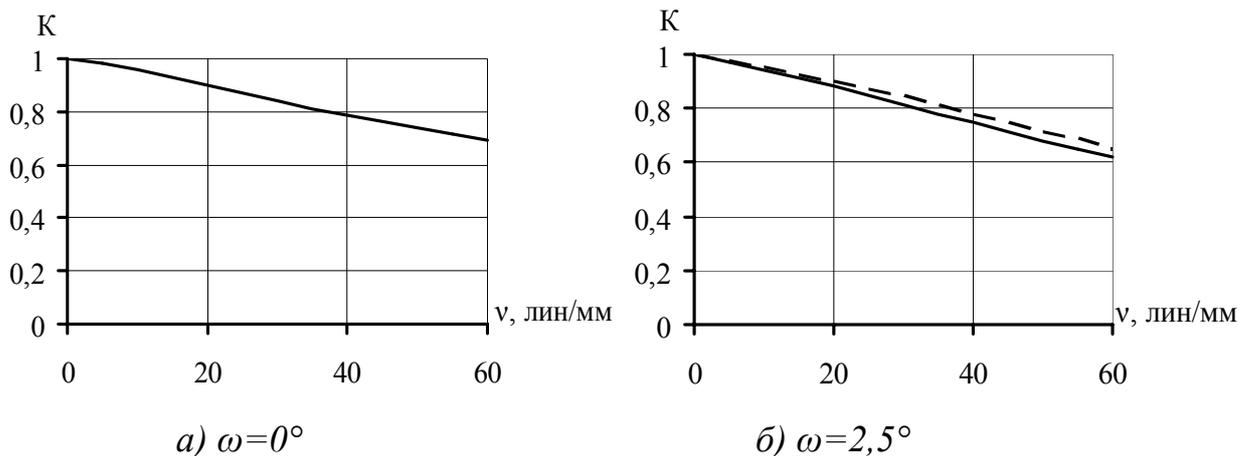


Рис.12 Частотно – контрастная характеристика объектива с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=2,5$ . Пунктирной линией обозначено сагиттальное сечение,  $v$  – пространственная частота,  $K$  – коэффициент передачи контраста.

**В пятой главе** диссертационной работы проведен анализ чувствительности полученных систем при изменении температуры окружающей среды от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$  и оценка допусков.

Системы, содержащие линзы из особого стекла, очень чувствительны к перепаду температуры внешней среды. Это приводит к терморасфокусировки или термоабберациям. В объективе коллиматора после юстировки, возможность перефокусироваться отсутствует. Поэтому при изменении температуры окружающей среды качество изображения в плоскости регистрации должно изменяться в допустимых пределах.

Изменение контраста объектива коллиматора представленного на рис.7 приведено в таблице 5. Критерием оценки качества изображения является частотно – контрастная характеристика. Для частоты 100 лин/мм контраст должен быть не ниже 0,2.

Таблица 5

*Контраст объектива коллиматора при частоте 100 лин/мм*

Температура	Осевая точка	Внеосевая точка	
		(меридион. сечение)	(сагитт. сечение)
20°C	0,46	0,31	0,45
10°C	0,46	0,31	0,45
30°C	0,41	0,27	0,35

Но имеется группа специальных оптических приборов, работающих в диапазоне температур от  $-40$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Так качество изображения объектива представленного на рис.11 при перефокусировке изменяется в допустимых пределах. Для частоты 60 лин/мм контраст в соответствии с техническим заданием, должен быть не ниже 0,6. Изменение коэффициент передачи контраста объектива в фиксированной плоскости регистрации приведено в таблице 6 и с перефокусировкой в таблице 7.

Таблица 6

*Контраст объектива с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=2,5$  при частоте 60 лин/мм в фиксированной плоскости регистрации*

Температура	Осевая точка	Внеосевая точка	
		(меридиональное сечение)	(сагиттальное сечение)
20°C	0,70	0,62	0,66
-40°C	0,67	0,45	0,47
50°C	0,50	0,50	0,55

Таблица 7

Контраст объектива с  $f'=90$  мм,  $2\omega=5^\circ$ ,  $K=2,5$  при частоте 60 лин/мм  
с перефокусировкой

Температура	Перефокусировка	Осевая точка	Внеосевая точка	
			(меридиональное сечение)	(сагиттальное сечение)
20°C	0 мм	0,70	0,62	0,66
-40°C	-0,025 мм	0,68	0,60	0,61
50°C	0,020 мм	0,70	0,62	0,66

### Заключение

Диссертационная работа посвящена исследованию и разработке апохроматических систем для широкой области спектра. В заключении отметим основные результаты:

1. Получена диаграмма зависимости относительной частной дисперсии от коэффициента дисперсии для области спектр 400 – 900 нм для стекол ГОСТа 3514– 94, флюорита и фтористого лития.
2. Получена формула для определения вторичного спектра систем из ахроматизованных компонентов в диапазоне длин волн 400 – 900 нм.
3. Обнаружено наличие трех экстремальных точек кривой остаточногохроматизма при апохроматической коррекции в диапазоне длин волн 400 – 900 нм.
4. Показана возможность устранения вторичного спектра для области спектра 400 – 900 нм с применением обычных стекол.
5. Разработаны практические рекомендации для построению оптических систем с апохроматической коррекцией из обычных стекол.
6. Сформулированы практические рекомендации по выбору оптических стекол для создания апохроматических термостабильных систем, работающих в области спектра 400 – 900 нм.
7. Разработаны объективы коллиматоров, работающих в области спектра 400 – 900 нм.

8. Разработаны светосильных объективов для области спектра 400 –900 нм.
9. Определена чувствительность полученных систем к изменению температуры окружающей среды.

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. *Грамматин А.П., Цыганок Е.А.* Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400 – 900 нм// Известие ВУЗов «Приборостроение».2011г. Т.54, №9, с.75 –77.
2. *Andrey G. Anisimov, Elena A. Tsyganok, and Igor A. Konyakhin* Study of the influence of the tetrahedral reflectors properties on autocollimating systems characteristics// Proc. SPIE, Vol. 7786, 77860V (2010); doi:10.1117/12.859822
3. *Грамматин А.П., Романова Г.А., Цыганок Е.А.* Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем// Методические указания к лабораторным работам. НИУ ИТМО. 2011, с. 113
4. *Цыганок Е.А.* Вторичный спектр в диапазоне длин волн 400 – 900 нм// Сборник трудов VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. Вып 1. Опотехника и оптическое приборостроение/ Главный редактор д.т.н.,проф. В.Л. Ткалич. – СПб:СПбГУ ИТМО,2009. с.164–166.
5. *Цыганок Е.А.* Коллиматоры для объективов, работающих в области спектра от 400 до 900 нм// Сборник тезисов докладов VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых/ Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. с.72 – 73.
6. *Цыганок Е.А.* Возможности исправления вторичного спектра// Сборник тезисов докладов VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых, Вып. 2. Труды молодых ученых/ Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. с.82 – 83.

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении  
«Университетские телекоммуникации»  
197101, Санкт – Петербург, Саблинская ул., 14  
Тел. (812) 233 4669   объем 1п.л.  
Тираж 100 экз.